

УДК 621.34-52

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ІНТЕРАКТИВНОГО ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО КОНТРОЛЕРА НА ГІБРИДНІЙ МОДЕЛІ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Попович М.Г., д.т.н., проф., Кіселичник О.І., к.т.н., доц., Бур'ян С.О., Соколовський О.Ф.
Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”
 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37
 E-mail: koi@gala.net, sburyan@voliacable.com

В статті представлено принцип дійства інтерактивного енергосберегаючого контролера насосної установки, технічні характеристики його експериментального образця і результати дослідницької роботи на спеціалізованому стенді.

Ключевые слова: інтерактивний контролер, насос, енергосбереження, електропривод.

The article deals with the pump interactive energy saving controller fundamentals. The technical characteristics of experimental controller sample are presented. The results of controller tests using special laboratory unit are described.

Key words: interactive controller, pump, energy saving, electrical drive.

Вступ. Сучасні способи енергоефективного керування насосними установками ґрунтуються на використанні керованих асинхронних двигунів з частотними перетворювачами, організації систем стабілізації напорів в диктуючих точках, рівнів води в резервуарах, тощо. Такий „технологічний” підхід дає суттєвий рівень енергозбереження [1, 2]. Подальше значне підвищення ефективності насосних установок можливе лише при врахуванні поведінки та потреб споживачів. Широкого розповсюдження на практиці набули системи програмного керування насосними установками відповідно до графіків добових потреб, які досить точно відображали ритм життя та потреби споживачів [1]. В епоху інформаційного суспільства, з прискореним темпом життя та з ненормованим робочим графіком значної частини суспільства, укласти точні графіки добових потреб практично неможливо. Тому ідея „інтерактивного” керування, при якому споживачі в режимі реального часу самі формують завдання швидкості насосної установки, є перспективною.

Теоретичні дослідження інтерактивного керування насосними установками висвітлено в [3, 4], де показано, що дані системи забезпечують рівень енергозбереження до 10% вищий, ніж системи стабілізації напорів.

Метою роботи є представлення результатів по технічній реалізації інтерактивного контролера та визначення впливу його параметрів на якість роботи електромеханічної системи насосної установки шляхом дослідження на гібридній моделі.

Матеріал і результати дослідження.

Енергозберігаючий інтерактивний алгоритм керування насосною установкою. Ідею інтерактивного керування насосною установкою ілюструє рис.1. Формування сигналів завдання системи водопостачання здійснюється на основі непрямого „опитування” споживачів (періодичного вимірювання витрат води). Тобто, завдання системи в автоматичному режимі визначається її навантаженням. Якщо

при зменшенні швидкості споживачі встановлюють фактичні витрати води більшими, ніж розрахункові значення, то швидкість збільшиться пропорційно співвідношенню фактичного і розрахункового значення, в протилежному випадку – зменшується. Отже, споживачі автоматично визначають мінімально-достатню швидкість для задоволення своїх потреб. Якщо споживачі не реагують на зміну швидкості, то вона фіксовано зменшується.

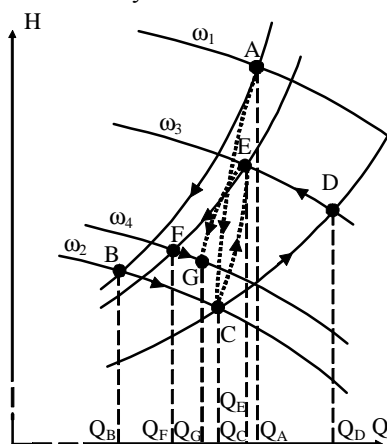


Рисунок 1 – Напорні характеристики насосу при інтерактивному енергозберігаючому керуванні

Розглянемо алгоритм інтерактивного керування більш детально.

Після запуску режим роботи насосної установки визначається робочою точкою А. Через деякий фіксований час T_0 швидкість насосу зменшується з величини ω_1 до ω_2 . Теоретично робоча точка має переміститись в положення В. Величина розрахункових витрат води при зниженні швидкості буде

$$Q_p = Q_B = Q_A \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (1)$$

Проте, споживачі в залежності від потреб води дещо зміщують робочу точку, у даному прикладі

вправо в положення С (перехід показано пунктирною лінією з А до С). Фактичні витрати складають $Q_{\phi}=Q_C$. Через час T_0 швидкість насоса змінюється згідно рівняння

$$\omega_3 = \omega_2 \frac{Q_{\phi}}{Q_p} = \omega_2 \frac{Q_C}{Q_B} = \omega_1 \frac{Q_C}{Q_A}. \quad (2)$$

Наступною теоретичною робочою точкою має стати точка D, але в залежності від своїх потреб споживачі можуть її змістити, наприклад, в положення E. Тоді через час T_0 швидкість насоса має бути наступною:

$$\omega_4 = \omega_3 \frac{Q_{\phi}}{Q_p} = \omega_3 \frac{Q_E}{Q_D} = \omega_2 \frac{Q_E}{Q_C}. \quad (3)$$

Далі процеси відбуваються аналогічно.

Математична формалізація алгоритму. Враховуючи достатньо високу жорсткість механічної характеристики асинхронного двигуна, для спрощення алгоритму використовується інформація про задання частоти замість швидкості [3]. Тоді величина задання бажаної частоти напруги двигуна на кожному наступному кроці алгоритму визначається залежністю

$$U_{zf}(nT_0) = \frac{kQ(nT_0)}{Q((n-1)T_0) + c} U_{zf}((n-1)T_0), \quad (4)$$

де U_{zf} – напруга задання частоти; k – коефіцієнт підсилення незначно менший одиниці; c – мала стала для уникнення випадку ділення на нуль; n – ціле додатне число; T_0 – період квантування.

Коефіцієнт k необхідний для забезпечення працездатності алгоритму при відсутності реакції споживачів на зміну швидкості, тобто при $Q(nT_0)=Q((n-1)T_0)$. Його введення суттєво спрощує технічну реалізацію контролера.

Структурна схема контролера, який реалізує запропонований алгоритм, представлена на рис. 2.

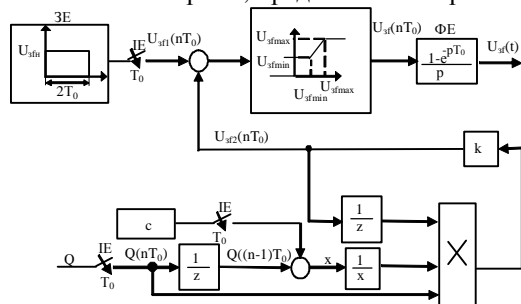


Рисунок 2 - Структурна схема реалізації енергозберігаючого алгоритму

Задаючий елемент ЗЕ формує напругу задання частоти перетворювача U_{zf1} , яка відповідає номінальному значенню і утримується протягом періоду часу $2T_0$. Період квантування T_0 повинен перевищувати час перехідних процесів в системі, викликаних стрибкоподібною зміною напруги задання частоти. Інформація про продуктивність насосу Q надходить до алгоритму в фіксовані моменти часу nT_0 за допомогою імпульсного елемента ІЕ. Формуючий елемент ФЕ перетворює дискретний сигнал U_{zf} в аналоговий. Ланки $1/z$ реалізують затримку сигналів на

такт квантування. Через нульові початкові умови роботи системи ($Q=0$, $U_{zf2}=0$) напруга U_{zf2} буде нульовою на час $2T_0$. Тоді значення напруги задання частоти U_{zf} визначатиметься лише напругою U_{zf1} , а далі – тільки U_{zf2} . Контролер дозволяє обмежити вихідну напругу на заданих максимальному та мінімальному рівнях.

Опис експериментальної установки. На рис. 3 показано експериментальний зразок інтерактивного контролера, реалізованого на основі мікроконтролера ATmega 8535 [5], ЦАП TLC5615C і трирозрядного семисегментного індикатора RL – T3620 SBAW/D15.

Живлення контролера здійснюється від стабілізованого джерела постійної напруги +5 В. Напруга з датчика витрат води повинна знаходитись в межах 0 – 2,56 В. Вихідна напруга контролера (завдання перетворювача частоти) може змінюватись від 0 до 5,12 В. За допомогою чотирьох кнопок можливий вибір наступних режимів індикації:

- індикація вхідної напруги контролера (напруги датчика витрат, встановленого на виході насоса);
- індикація вихідної напруги контролера;
- індикація, збільшення, зменшення та запам'ятовування величин періоду квантування T_0 (від 15 с до 1485 с з дискретністю 15 с), коефіцієнту k (в межах від 0,8 до 0,99), U_{zfmin} (від 0 до 3,5 В), U_{zfmax} (від 3,9 до 5,2 В).

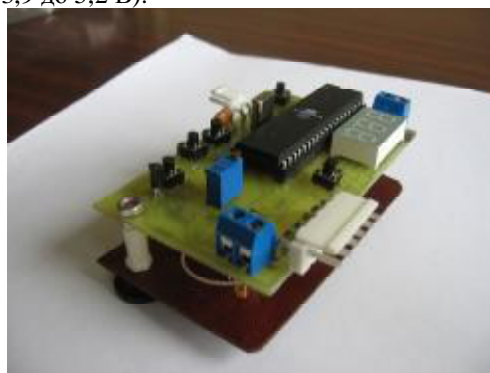


Рисунок 3 - Експериментальний зразок інтерактивного контролера

Програмне забезпечення написано в середовищі AVR Studio 4.12 та відлагоджено за допомогою програматора Starter Kit STK500.

Для проведення досліджень розроблено спеціалізований випробувальний стенд, функціональна електрична схема якого представлена на рис. 4, а зовнішній вигляд – на рис. 5.

Для стенда використано транзисторний перетворювач частоти фірми Mitsubishi FR–E520S потужністю 0,75 кВт з вбудованими задатчиком інтенсивності, ПІД-регулятором, можливістю частотного та векторного керування двигуном. Завдання частоти перетворювача подається через аналоговий вхід 2 або з пульта FR–PA02. Модель насосної установки у вигляді аперіодичної ланки другого порядку реалізовано за допомогою плати на операційних підсилювачах. На стенді передбачена можливість налаштування коефіцієнтів передачі, сталих часу моделі та величини збурення g , а також індикація вихідного та

проміжних сигналів на вольтметрах та осцилографі. На цій же платі знаходиться модель датчика технологічного параметру (витрат) з виходом по напрузі (0-10 В) чи струму (0-20 мА) та можливістю створення початкового ненульового сигналу при нульовому значенні параметру. Для імітації моменту навантаження на валу насоса розроблено регульоване джерело моменту на основі комплектного електроприводу БТУ 3601. До стенду підключається пара електричних машин: асинхронний двигун АОЛ-11-4 потужністю 0,6 кВт і двигун постійного струму Г-11 потужністю 0,8 кВт. Як тахогенератор використано колекторний мікродвигун СЛ-261.

Дослідження роботи інтерактивного енергозберігаючого контролера. Дослідження проведено при обмеженні вихідної напруги контролера від 1 до 5,1 В, $k=0,99$, $T_0=15$ с. Параметри моделі насоса обирались такими, щоб при максимальній швидкості обертання на виході датчика була напруга 2,56 В та перехідні процеси в насосі носили аперіодичний

характер. Збільшення величини g означає зменшення гідравлічного опору мережі, зменшення g – навпаки. Дослідження підтвердили працездатність запропонованого інтерактивного контролера як при векторному керуванні, так і при частотному керуванні асинхронним двигуном ($U/f=\text{const}$, $U/f^2=\text{const}$). У випадку відсутності реакції споживачів на зміну обертів насоса ($g=\text{const}$ та незмінного положення потенціометра R7) двигун розганяється до максимальної швидкості при $f=50$ Гц, а далі кожні 15 секунд відбувається зменшення швидкості на 1% відносно її попереднього значення. При досягненні нижньої межі частота складає 10 Гц. Подальше зменшення швидкості можливе лише при зменшенні нижньої межі вихідної напруги контролера. Якщо під час періодів квантування відбувається зменшення гідравлічного опору, то зменшення швидкості відбувається згідно рівняння (4) значно швидше, ніж при відсутності реакції споживачів.

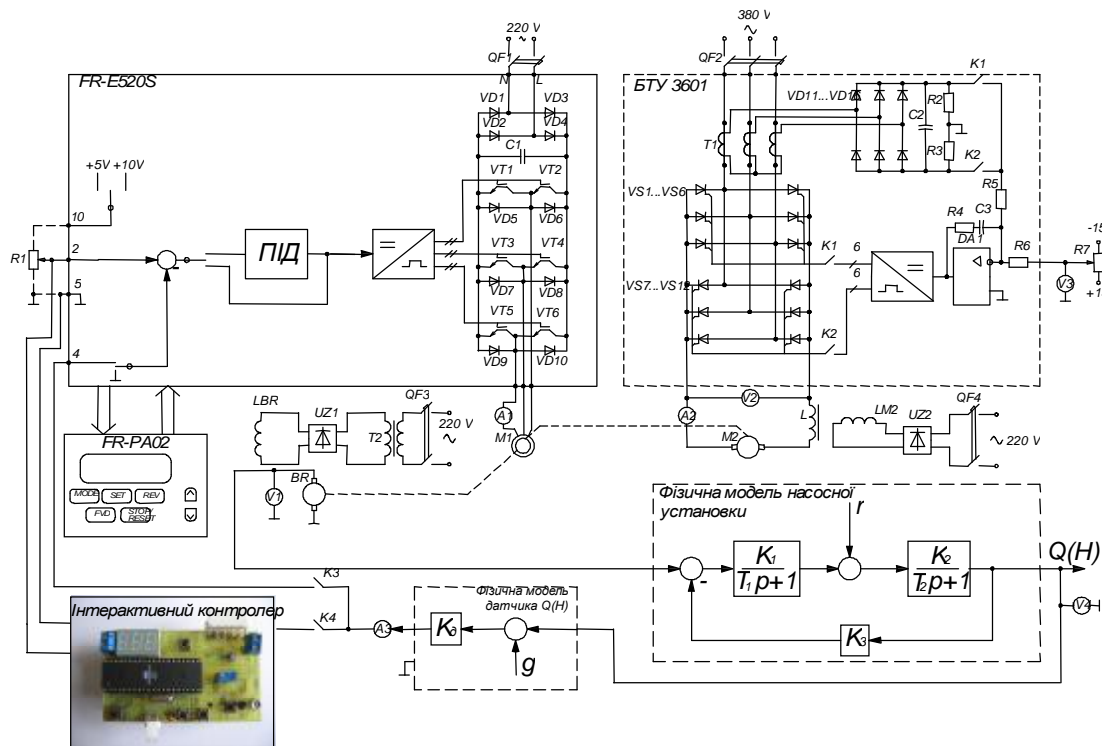


Рисунок 4 - Схема функціональна електрична випробувального стенду



Рисунок 5 - Зовнішній вигляд випробувального стенду

Якщо під час періоду відбувається різке збільшення гідравлічного опору, то на наступному періо-

ді встановлюється мінімально можлива частота напруги двигуна. При зменшенні гідравлічного опору,

якщо напруга на вході контролера буде вищою, ніж попереднє значення з урахуванням k ($kQ(nT_0) > Q((n-1)T_0)$), то швидкість збільшуватиметься. При цьому при подальшій відсутності реакції споживачів, якщо виконуватиметься вищезазначена нерівність, швидкість збільшуватиметься. У випадку, якщо насос обертається з невисокою швидкістю, навіть незначне зменшення гідравлічного опору призводить до максимально-можливої швидкості на наступному періоді. Дослідження проводились при відсутності моменту навантаження на валу двигуна насоса та при двократному номінальному навантаженні. Довільні зміни g та моменту навантаження під час періодів квантування не впливають на факт стійкості системи, оскільки вимірювання координат відбуваються в фіксовані моменти часу, а період квантування є достатнім для затухання перехідних процесів.

При швидкостях обертання близьких до номінального значення, внаслідок високої жорсткості механічної характеристики двигуна, при зміні моменту навантаження від 0 до двократного номінального, продуктивність Q зменшується на 0,4%. Цієї зміни достатньо для очікуваної реакції інтерактивного контролера. При низьких частотах (10 Гц) внаслідок пом'якшення механічної характеристики двигуна зменшення Q складає 65%. Тому інтерактивний контролер є чутливим навіть до незначної зміни моменту навантаження.

Зміни g та моменту навантаження на валу двигуна в реальних насосних установках взаємопов'язані [6]. Тому обов'язковим є уточнення вищенаведених висновків та закономірностей на реальній фізичній моделі насосної установки.

При максимально-можливій швидкості і мінімально можливому гідравлічному опорі мережі швидкість може лише зменшуватись. Тому, для підтримання необхідного рівня витрат води (при максимально можливій швидкості), споживачам необхідно тимчасово збільшити гідравлічний опір, а згодом зменшити його до мінімально можливого значення.

Зменшення величини k призводить до стрімкішого періодичного падіння швидкості, але понижує чутливість контролера до зменшення гідравлічного опору з необхідністю збільшення швидкості.

Зміна параметрів інтерактивного контролера (верхньої та нижньої меж вихідної напруги, періоду, k) та режимів індикації під час роботи системи не впливають на її стійкість та працездатність.

Висновки. Робота інтерактивного контролера є більш ефективною при великій кількості споживачів, що унеможливує різкі значні зміни гідравлічного опору.

Вибір коефіцієнта затухання k необхідно здійснювати в суперечливих умовах необхідної інтенсивності зменшення швидкості, чутливості контролера до зменшення гідравлічного опору мережі та взаємовпливу насосу і електропривода через момент опору на валу.

З метою зручності експлуатації алгоритм роботи інтерактивного контролера вимагає вдосконалення для граничних умов при мінімально можливому зниженні гідравлічного опору.

Вищого рівня енергозбереження можна досягнути при змінній величині k : при зменшенні швидкості мінімально можливе значення $k=0,8$, при збільшенні $k=0,99-1$.

Період квантування T_0 повинен перевищувати час перехідних процесів в системі, але не бути занадто великим, щоб не збільшувати час очікування споживачів на бажану зміну витрат води після зміни положення водозапірної арматури.

З метою універсальності контролера та гнучкості системи керування необхідно передбачити в контролері вхід для датчиків витрат з імпульсним виходом.

Алгоритм інтерактивного контролера доцільно поєднати з системою захисту насоса від підтоплення і сухого ходу, з датчиками виходу на режим при запуску та відкритті блокуючої засувки.

Рівень енергозбереження системи визначається рівнем зменшення швидкості насоса відносно номінального значення.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ДАНІ

1. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
2. Шевчук С.П., Воробьева Н.П., Шевчук Н.И., Шевчук Н.А. Техничко-экономическая оценка эффективности применения преобразователей частоты электроприводов для регулирования производительности механизмов с вентиляторной характеристикой момента на валу // Энергетика: економіка, технології, екологія. Науковий журнал. №1 (16), 2005. – С. 17-25.
3. Попович М.Г., Печеник М.В., Кіселичник О.І., Соколовський О.Ф. Енергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: проблеми автоматизованого електропривода. Випуск 66. Київ: Техніка, 2006. – С. 311-314.
4. Popovich N.G., Pechenik N.V., Kiselichnik O.I., Kovalchuk A.V., Extremal electromechanical automatic control systems and energy conservation // RUSSIAN ELECTRICAL ENGINEERING C/C OF ELEKTROTEKHNIKA/ 2003, VOL 74; PART 3. – P. 8-13 // ALLERTON PRESS, INC. USA
5. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. 2-е изд. испр. Издательство: Додэка XXI [М.], 2006. – 288 с.
6. Попович М.Г., Кіселичник О.І. Електромеханічні системи автоматичного керування робочими параметрами турбомеханізмів на основі принципу пасивності // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Вісник НТУ "ХПІ". – Вип. 43, 2004. – С. 16-19.

Стаття надійшла 15.04.2007 р.